

논문 98-7-5-02

TDM 방식의 2채널 광섬유 센서 배열 특성 연구

이종길

Characteristics of 2-Channel TDM fiber-optic sensor array

Jongkil Lee

요약

다채널을 가진 광섬유 센서 시스템을 개발하기 위하여 이것의 기본적인 센서 배열로서 TDM(Time Division Multiplexing) 방식의 2채널 광섬유 센서 배열을 제작하여 그 특성을 실험으로 분석하였다. 2채널 배열의 위상구조는 Mach-Zehnder형 사다리 구조로 제작 되었고 감지 간섭계와 보상 간섭계가 있는 PMDI(Phase-Matched Differential Interferometer) 기법을 사용하여 배열의 신호처리를 용이하게 하였다. 신호처리에는 합성 헤테로다인(Synthetic Heterodyne)을 이용한 신호처리 기법으로 2채널의 신호를 동시에 검출 하였다. 실험 결과 각 채널의 감도는 센서 #1에서 $\sim 60\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, 센서#2에서 $\sim 80\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 를 얻었으며, 상호 간섭량(crosstalk)은 -36dB로 측정 되었다. 본 실험으로 TDM 방식으로 다중화된 Mach-Zehnder형 사다리 구조 간섭계의 신호처리가 광섬유 센서의 효율을 높이고 비교적 안정적으로 신호를 감지함을 확인 하였다.

Abstract

To develop the multi-channel fiber-optic sensor array system, two-channel TDM(Time Division Multiplexing) fiber-optic sensor array was constructed and characterized. The sensor array topology was Mach-Zehnder ladder type and PMDI(Phase-Matched Differential Interferometer) technique was used to exploit the efficiency of the array signal processing. By using a synthetic heterodyne demodulation technique, outputs of the two channels were monitored simultaneously. The sensitivities of channel #1 and #2 were measured $\sim 60\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ and $\sim 80\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, respectively. Crosstalk of sensors in the array was found to be approximately -36dB. Based on the results, we could conclude that TDM Mach-Zehnder ladder type sensor array can be used to detect the acoustic signal with stability and efficiency of the sensor array.

1. 서 론

광섬유를 이용한 센서 제작 기술은 광섬유의 저손실화 및 다중화 기술의 발전과 함께 이를 이용한 보다 효율적인 광간섭계의 개발이 이루어져 계측, 해양, 항공 등 다양한 산업분야에 응용이 되고 있다.^[1-5] 광섬유 센서를 이용한 배열은 하나의 광섬유에 다수의 센서를

연결할 수 있으며, 다양한 형태로 구성할 수 있다. 따라서 센서들중 비교적 감도가 높고 특정 배열 시스템에의 적용이 용이한 형태가 간섭계형 센서로 알려져 있다.^[3,4] 간섭계형 배열 센서는 적절한 광섬유 배열구조를 사용하여 하나의 광섬유 가닥에 많은 갯수의 센서들을 연결할 수 있도록 하며, 이러한 방식은 다채널 센서를 요구하는 소나 시스템(SONAR system)에 필수적이라 할 수 있다. 광섬유 배열 구조는 다중화(multiplexing) 방식과 밀접한 연관이 있으며 주로 연

안동대학교 기계공학교육과 (Mechanical Engineering Education Department, Andong National University.)

<접수일자 : 1998년 5월 14일>

구 되어온 다중화 방식은 TDM(Time Division Multiplexing), WDM (Wavelength Division Multiplexing), CM(Coherence Multiplexing) 및 FDM(Frequency Domain Multiplexing) 등이다. 특히 TDM 방식은 배열 센서 개발 초기부터 연구 되어 온 방식으로 가장 단순하면서도 효율적이어서 현재도 꾸준히 연구되고 있는데 이것의 기본 원리는 입력광을 펄스형태로 입사하여 배열상의 각 감지센서를 거쳐 나오는 출력 광펄스의 시간차를 이용하는 것이다. 이러한 TDM 시스템은 효과적인 광출력 사용과 배열 센서 채널간의 균등한 레이저 출력 분배가 시스템 설계의 기본이다.

Brooks^[6] 등은 TDM 방식을 채택하여 지연 광섬유와 감지 광섬유가 효율적으로 배치된 사다리 구조의 센서 배열을 연구 하였는데 두 개의 감지부를 사용한 실험에서 측정 감도는 약 $\sim 60\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 였으며 상호 간섭량 (crosstalk)은 -55dB 이하였다. DRA (Defence Research Agency)에서는 6채널 불평형 시스템 (unbalanced system)으로 $400\text{Hz}\sim 2\text{kHz}$ 의 주파수 영역에서 해상상태 0(DSS0)보다 10dB 이상 낮은 소음준위를 얻었으며 이러한 시스템으로 DSS0의 소음수준을 유지하면서 30채널 정도까지 확장할 수 있다고 하였다.^[7] 또한 Kersey^[8,9] 등은 64채널 TDM 배열형 센서를 제작하여 실험 하였는데 여기서는 EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)를 이용하여 입력 광펄스를 100mW 까지 증폭 하였으며, $5\text{Hz}\sim 7\text{kHz}$ 신호 주파수 범위에서 $200\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 감도를 얻었다.

또한 Kirkendall^[10] 등은 두 개의 32채널 WDM/TDM 시스템을 제작하여 이를 해상 실험 하였는데 사용된 센서 배열의 총 길이는 약 100km 였고 $5\text{Hz}\sim 6\text{kHz}$ 주파수 대역에서 환경 잡음 측정과 목표물 추적등을 시험 하였다. 이러한 광섬유 센서 배열의 응용은 현재까지 주로 수중에서의 효율적 음파 탐지를 위한 수중 감시 체계에 응용이 되고 있다.^[11-13]

본 연구에서는 다채널을 가진 광섬유 센서 시스템을 개발하기 위한 센서 배열로서 TDM 방식의 2채널 광섬유 센서 배열을 제작하여 그 특성을 실험으로 측정 하였다. 2채널 배열은 Mach-Zehnder형 사다리 구조로 제작 되었고 감지 간섭계와 보상 간섭계가 있는 PMDI 기법을 사용하여 배열의 신호처리를 용이하게 하였다. 합성 헤테로다인 기법을 이용한 신호처리 기법으로 2채널의 신호 출력을 동시에 검출 하고 배열상의 각 광

섬유 센서들의 감도 특성을 분석 하였다. 또한 다채널 광섬유 센서 배열에의 적용 가능성을 본 실험을 통하여 제시된 기법들을 이용하여 탐색 하였다.

2. 배열 간섭계 설계

본 실험에 사용된 간섭계 형태는 PMDI (Path Matched Differential Interferometry)형이며 신호처리를 쉽게 할 수 있도록 간섭계를 감지 간섭계와 보상 간섭계 두 부분으로 분리 하는 것을 말한다.^[14] 이 간섭계는 감지 광통로와 기준 광통로간의 광경로차, $\Delta(nL)$ 또는 시간차가 매우 큰 불평형 Mach-Zehnder 간섭계(Unbalanced Mach-Zehnder Interferometer)로 이루어져 있다. 만약 입사 광펄스의 폭이 불평형 간섭계의 시간차 ΔT 보다 작다면 간섭계를 통과한 뒤에는 ΔT 만큼 분리된 두 개의 펄스로 나누어 진다. 이 두 개의 광펄스가 위의 간섭계와 경로차가 동일한 다른 불평형 간섭계를 지날때 첫 번째 간섭계를 지나면서 발생된 시간차가 두 번째 간섭계를 지난 뒤 보상되면서 서로 간섭하는 광펄스가 생긴다. 특히 광경로차가 동일한 두 개의 불평형 간섭계를 사용하는 이유는 신호처리에 필요한 소자들을 보상간섭계에 모두 장치하여 감지부에는 전기적인 소자들이 없는 수동형 원격 측정을 하기 위해서이다.

TDM 방식의 직접적인 접근법은 각각의 Mach-Zehnder 간섭계에 적당한 시간지연을 갖도록 연결한 다음 펄스화된 광원을 사용하여 개별 센서들의 정보를 얻는 것이다. 즉, N개의 센서배열 이라면 하나의 입력 광펄스에 대해 N개의 출력 펄스열들이 나오게 된다. 간섭계의 광경로차가 작기 때문에 기준 경로와 신호 경로를 통과한 펄스들은 서로 겹쳐서 간섭하게 되고 결국 출력 펄스열은 각각의 단일 센서의 출력을 시간 순으로 배열한 것이된다. 결과적으로 본 실험과 같은 구조인 두 개의 센서를 갖는 배열구조에서 한 개의 광펄스가 TDM의 기본구조에 입사되면 간섭펄스 두 개를 포함해서 모두 네 개의 출력펄스가 생기게 되며 그 중에서 간섭을 일으킨 펄스 두 개만을 분리해서 간섭 무늬 변화를 분석하면 위상변화를 일으킨 외부 물리량을 측정할 수 있다. PMDI 방법을 이용한 간섭계의 출력을 신호처리 하기 위한 방법은 PGC 방식이나 헤테로다인 방식, 3X3 방향성 결합기를 사용한 수동 호모다인 기법등이 있다.^[15] 본 실험에서는 간섭계의 한쪽

광통로에 걸어주는 수십 kHz의 위상변조 및 위상변조 신호와 주파수가 같고 동기된 신호로 간섭계 출력을 진폭변조 하는 합성 헤타로다인 신호처리 기법을 이용하였다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치의 구성

본 실험에 사용된 시분할 다중방식(TDM)을 이용한 광섬유 센서 배열 시스템 구성도를 그림 1에 보였다. 사용된 광원은 파장이 1319nm인 Nd-YAG 레이저(Lightwave사, model 125-1319-100)를 사용하였으며, 이것의 최대출력은 100mW이다. 광원의 출력단은 편광 유지 광섬유에 결합되고 광섬유의 끝단은 FC/PC 콘넥터로 처리되었다. 광 역방향 흐름방지기(isolator)는 30dB의 고립성을 갖고 출력광은 선편광 상태이다. 광펄스 발생기는 광-음향 변조기(AOM, Acousto-Optic Modulator)와 구동 드라이버(model 223A-1), 펄스 발생기(HP8131A)를 사용하여 발생시켰으며, AOM(ISOMET사, model 1206C)의 중심 주파수는 110MHz이고 양끝단에 4축 조정기가 있어 입력광과 출력광의 광섬유 결합 각도를 조정할 수 있게 되어 있다. 광섬유 센서로는 유연성이 좋은 맨드릴(mandrel)에 광섬유를 100m정도 감아 두 개의 센서로 제작하여 사용하였다.

간섭계에 쓰인 방향성 결합기 DC₁과 DC₂는 가변형 방향성 결합기(FiberPro TDC-130-B-NP-DM)를 사용하였으며 결합손실은 0.06dB이고 콘넥터를 사용할때는 1.5dB이하이다. 출력버스에서 나오는 광펄스들의 세기를 일정하게 맞추기 위하여 DC₁의 결합비율을 2:1, DC₂의 결합비율을 1:1로 조정하였으나 실제 시스템 구성상 콘넥터 손실 및 스플라이싱(splicing) 손실등으로 정확한 계산값으로는 되지 않는다. 단일모드 광섬유를 사용하여 그림 1과 같이 두 개의 감지 간섭계와 한개의 보상 간섭계를 갖는 사다리구조의 배열형 간섭계를 구성하였다. 간섭계에 펄스폭 20ns의 짧은 광펄스를 입사하여 디지털 오실로스코프(HP54542C)로 펄스의 분리 간격을 측정하여 광경로차를 계산한 결과 첫번째 감지 센서 간섭계는 107.03m, 두번째 감지센서 간섭계는 99.73m, 보상 간섭계는 102.97m 이었다.

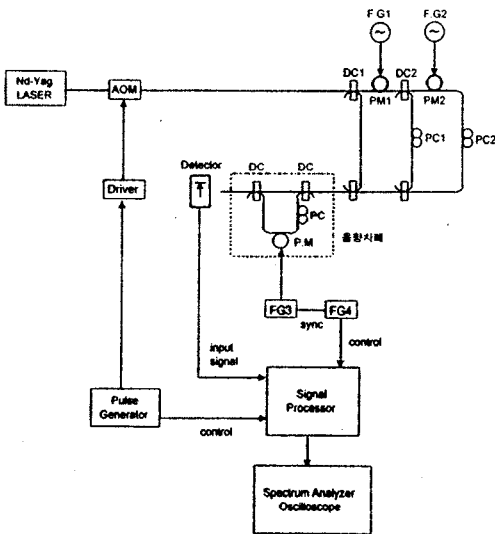


그림 1. 광섬유 센서 배열 시스템 구성도
Fig. 1. System configuration of the fiber-optic sensor array

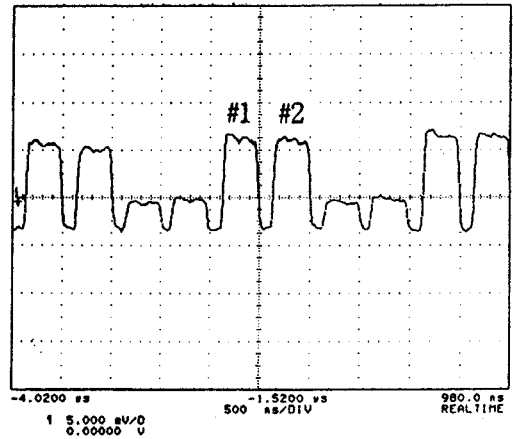


그림 2. 보상 간섭계 출력
Fig. 2. Output signal after compensating interferometer

신호처리를 위한 변조신호와 모의 음향신호를 발생시키기 위한 위상 변조기는 PZT에 광섬유를 감아서 사용하였으며, 간섭 펄스의 가시성(visibility)을 최대화하기 위하여 고리형 광섬유 편광조절기(FiberPro사, Polarization Controller)를 사용 하였다. 보상간섭계는 주위 환경 잡음의 영향을 최소화 하기위해 음향 차폐 상자 내에 두었다. 보상 간섭계를 지난 최종 광펄스는 입력 광펄스 하나에 대하여 그림 2에 보인것과 같이 네개의 펄스열이 나오게 되며 이 중 가운데 두 개의 펄스열이 차례로 센서 #1과 센서 #2의 신호를 담고 있다. 보상 간섭계에는 위상변조를 위해서 PZT위상 변조

기를 부착하였으며, 함수발생기(SRS DS345)를 사용하여 15kHz 주파수로 위상진폭 2.8rad에 해당하는 전압을 인가하였다. 이렇게 분리된 센서 #1과 센서 #2의 출력이 신호처리회로의 각 채널의 구성은 그림 3과 같다.

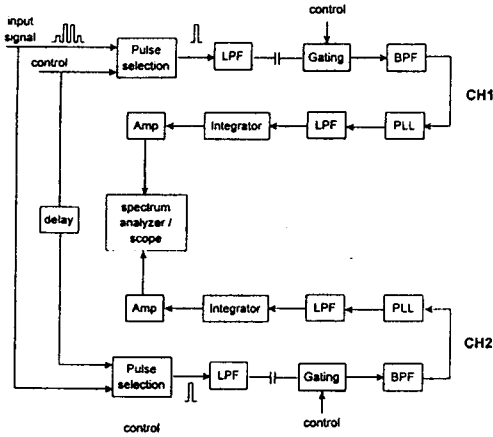


그림 3. 신호처리 개념도
Fig. 3. Configuration of the signal processor

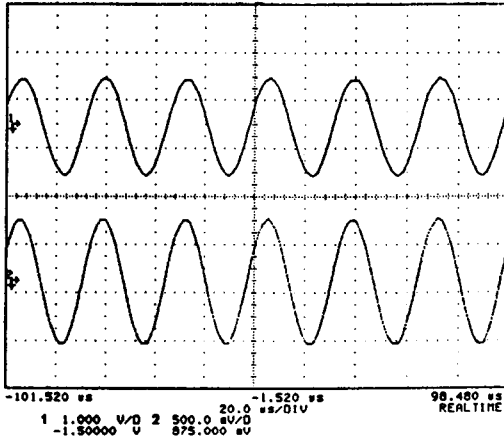


그림 4. 대역 통과필터 출력
Fig. 4. Signal output after band pass filter

보상 간섭계의 위상 변조 신호에 동기된 제어 신호로 아날로그 스위치를 구동하여 특정 센서의 신호 정보를 추출한 후 저주파 통과필터로 펄스열들의 포락선(envelope)을 추출하였다. 이후 위상 변조 주파수와 같은 주파수의 펄스로 진폭 변조한 다음 중심 주파수 30kHz의 대역 통과필터(BPF)를 통과시켜 그림 4의 출력을 얻었다. 보상간섭계의 위상 변조진폭과 동기 신호

들 사이에 위상이 잘 맞으면 그림 4의 출력 신호는 진폭이 변하지 않고 일정하며 환경 잡음에 의한 느린 주파수의 위상 흔들림과 감지부에 인가한 신호에 따라 좌우로 움직이는 파형을 얻을 수 있다. 여기서 위상 변화량 만큼 검출하기 위하여 PLL 회로를 사용하여 30kHz의 기준파형과 위상 비교를 함으로써 원하는 위상 정보를 얻을 수 있다.

3.2 센서 감도 계산

센서가 감지할 수 있는 최소의 위상 변화량으로서의 센서감도 측정에는 스펙트럼 분석기로 출력 스펙트럼을 분석하여 잡음준위로 신호가 줄어들때 감지부에 있는 모의 신호를 인가하는 위상 변조기의 위상변화량을 측정하거나 위상 변조기로 일정한 위상 변화를 주고 스펙트럼 분석기로 신호크기를 측정하여 S/N비를 1로 하는 값을 계산해 낸다. 본 실험에서는 감도를 측정하기 위하여 감지부의 모의 음향 신호를 인가하는 PZT 위상 변조기에 주파수 2kHz, 위상 변조 진폭 10mrad의 정현파 신호를 인가 하였다. 이것은 감지부에 감긴 광섬유가 주변의 장비에서 발생하는 소음등 환경 잡음에 노출되어 있으므로 정확한 감도 측정을 위하여 환경잡음이 심한 주파수 영역을 피하였다. 간섭계 출력을 합성 헤테로다인 신호처리를 하여 PLL로 위상 복조를 하기전에 30kHz의 캐리어 주파수에 측대파(side band)로 나타나는 모의 음향 신호의 크기를 스펙트럼 분석기를 사용하여 분석하였다. 그림 5에는 모의 음향신호가 없을때 30kHz에서 캐리어의 첨두치(peak value)를 볼 수가 있다.

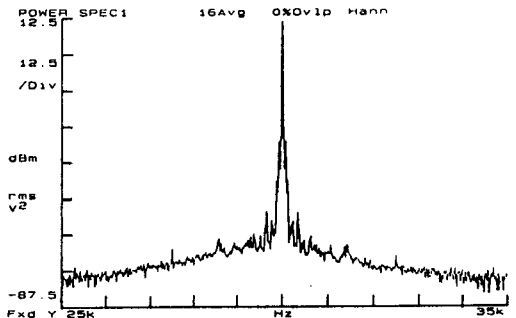
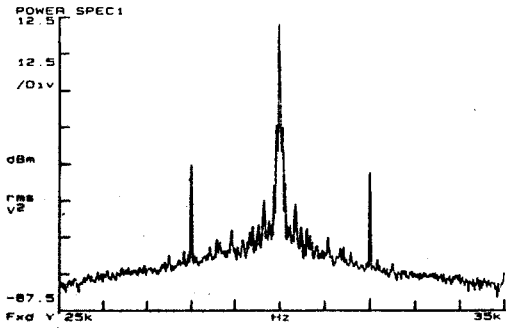
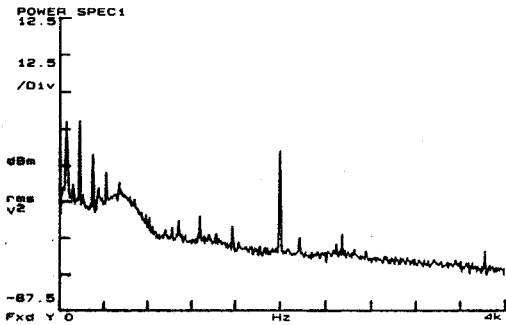


그림 5. 신호가 없을때의 캐리어 첨두치와 소음 준위
Fig. 5. Carrier peak and noise level without acoustic signal



(a) 대역 통과필터후 스펙트럼 (소음 준위: -74 dBm, 신호 첨두치: -40.4 dBm)
 (a) Spectrum after band pass filter(noise level: -74 dBm, signal peak value: -40.4 dBm)



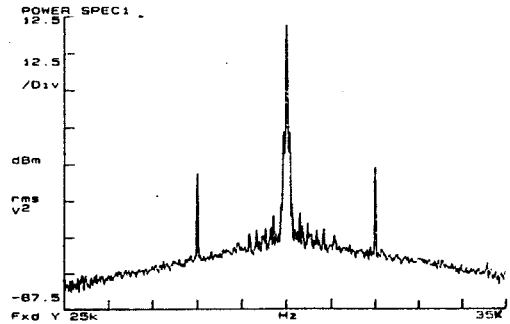
(b) 최종출력 스펙트럼(소음 준위: -67.9 dBm, 신호 첨두치: -32.1 dBm)
 (b) Final output spectrum(noise level: -67.9 dBm, signal peak value: -32.1 dBm)

그림 6. 2kHz, 10mrad의 신호를 인가 하였을 때 출력 스펙트럼(센서 #1)

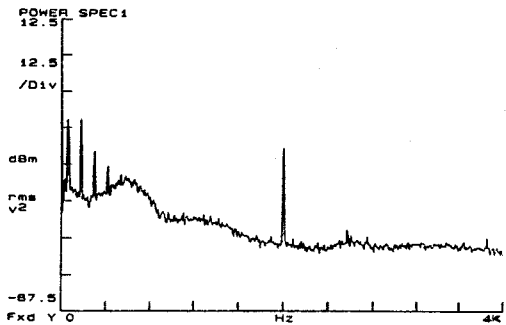
Fig. 6. Output spectrum of the sensor #1 with 2kHz, 10mrad signal

그림 6(a)는 센서 #1에 주파수 2kHz, 위상 변조 진폭 10mrad을 인가 하였을때의 스펙트럼인데 30kHz의 캐리어에 측대파로 28kHz와 32kHz에서 신호 첨두치를 볼 수 있다. 잡음준위에 대한 32kHz의 신호크기를 측정하여 $48 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 감도를 얻었다. 그림 6(b)는 신호를 PLL을 사용하여 위상을 복조한 후 적분한 최종 출력이며 2kHz에서 신호의 첨두치가 나타나 있다. 1kHz 미만의 저주파 영역에서 전체적으로 잡음준위가 높은것을 알 수 있고 60Hz성분과 고조파들을 볼수가

있다. 여기서 계산된 감도는 $59 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이었다. 최종 출력의 감도가 다소 떨어지는 이유는 PLL회로 이후의 전자적인 잡음 때문인 것으로 판단된다.



(a) 대역 통과필터후 스펙트럼 (소음 준위: -69.3 dBm, 신호 첨두치: -38.5 dBm)
 (a) Spectrum after band pass filter(noise level: -69.3 dBm, signal peak value: -38.5 dBm)



(b) 최종출력 스펙트럼(소음 준위: -64.7 dBm, 신호 첨두치: -31.8 dBm)
 (b) Final output spectrum(noise level: -64.7 dBm, signal peak value: -31.8 dBm)

그림 7. 2kHz, 10mrad의 신호를 인가 하였을 때 출력 스펙트럼(센서 #2)

Fig. 7. Output spectrum of the sensor #2 with 2kHz, 10mrad signal

같은 방법으로 센서 #2의 감도를 측정하였는데 그림 7(a)에서와 같이 BPF 출력에서 계산된 감도는 $66 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이었고 그림 7(b)의 최종출력에서 계산된 감도는 $83 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 였다. 센서 #1보다 센서 #2의 감도가 다소 떨어지는 이유는 스위치 제어 신호의 지연

시간이 정확히 맞지 않아 센서 #2에 오는 펄스만을 게이팅하지 못하기 때문이라고 판단된다.

센서 #1과 센서 #2와의 상호간섭량(cross talk)을 측정하기 위하여 센서 #1에는 주파수 2.6kHz, 위상 진폭 100mrad의 신호를 인가하고 센서 #2에는 주파수 2kHz, 위상진폭 10mrad의 신호를 인가한 상태에서 센서#2의 출력을 스펙트럼분석기로 분석하였다. 그림 8의 대역 통과필터 출력에서 두 센서간에 상호 간섭현상이 발생한 것을 볼 수 있는데 이것의 크기를 계산한 결과 직접신호의 1.62%(-35.8dB)를 얻었다. 또한 표본율(sampling rate)을 최대로 하기 위해 펄스 주기를 15 μ s로 하여 하나의 입력 펄스에서 생기는 네번째 출력 펄스와 그 다음 입력 펄스에서 생기는 첫번째 출력 펄스가 서로 겹치도록 하였다. 이렇게 하면 겹치는 펄스는 큰 위상 잡음을 포함하게 된다. 이 상태에서 각 센서들의 감도를 측정하였는데 센서 #1의 경우 51 μ rad/ \sqrt{Hz} 이고 센서 #2는 80 μ rad/ \sqrt{Hz} 이었다. 펄스 주기가 2.0 μ s였을 때 보다 센서 #1은 별다른 차이를 보이지 않았지만 센서 #2의 경우는 다소 감도가 떨어졌다. 또한 센서간의 상호 간섭은 펄스를 게이팅하는 스위치의 성능과 관련이 크며 스위치의 성능을 향상시키므로서 상호 간섭량의 크기를 줄일 수 있다고 판단된다.

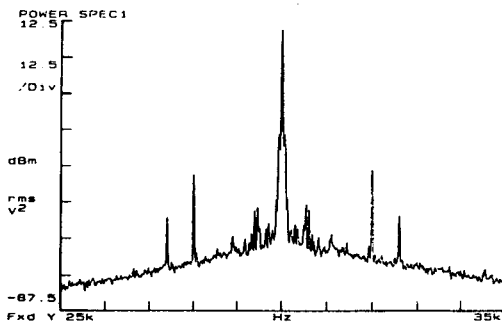


그림 8. 두 개의 센서 배열에서 일어나는 상호 간섭량
Fig. 8. Crosstalk between two sensors

(noise level: -68.2dBm, -37.9dBm at 32kHz,
-53.0dBm at 32.6kHz)

따라서 본 실험을 통하여 Mach-Zehnder 사다리 구조 간섭계형과 TDM 방식의 신호처리가 광섬유 센서 배열의 효율성을 높이고 비교적 안정적인 음향 신호를 감지하는 특성이 있음을 확인 하였다. 또한 센서간의

상호 간섭은 펄스를 게이팅하는 스위치의 성능과 관련이 크며 스위치의 성능을 향상 시키므로서 상호 간섭량의 크기를 줄일 수 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 다채널을 가진 광섬유 수중 음향 청음기 배열(fiber-optic hydrophone array)의 기본 설계를 위한 선행 연구로서 2채널 광섬유 센서 배열을 제작하여 그 감도 특성을 공기중에서 실험으로 분석하였다. 실험에 사용된 광섬유 센서들의 다중화 방식은 시분할 다중 방식(TDM)을 이용하였으며 합성 헤더로 다인 방식을 이용하여 신호처리 하였다. 또한, 이것의 배열 위상구조는 PMDI(Path-Matched Differential Interferometer)기법을 이용한 Mach-Zehnder형 사다리 구조를 이용하였다. 실험을 통하여 얻어진 각 센서들의 감도는 각각 $\sim 60 \mu\text{rad}/\sqrt{Hz}$ 및 $\sim 80 \mu\text{rad}/\sqrt{Hz}$ 이었으며 두 센서의 상호간섭량은 -36dB 정도임을 확인하였다. 특히 두 센서간의 감도차와 상호 간섭량은 간섭계를 구성할 때 단일모드 광섬유와 방향성 결합기의 스플라이싱 손실(splicing loss) 및 광소자들의 광학적 특성등에 기인한 것으로 판단되며 본 실험을 통하여 Mach-Zehnder형 사다리 구조 간섭계형과 TDM 방식의 신호처리가 광섬유 센서 배열의 효율성을 높이고 비교적 안정적인 음향 신호를 감지하는 특성이 있음을 확인 하였다. 그러나 광섬유 센서의 감도는 신호처리 회로의 성능에 민감하게 반응하므로 아날로그 신호처리 회로의 개선을 통한 감도 향상 연구가 동시에 진행되어야 한다고 본다.

참고문헌

- [1] A. Dandridge, "The development of fiber optic sensor systems," Proc. SPIE, 2360, pp. 154-161, 1994.
- [2] J. Bucaro et. al., "Fiber-optic hydrophone," J. Acoustical Society of America, 62, pp. 1302-1304, 1997.
- [3] I. Giles et. al., "Coherent optical fiber sensors with modulated laser sources," Electron. Letter, 19, pp. 14-15, 1983.
- [4] J. Brooks et. al., "Coherence multiplexing of fiber

- optic interferometric sensors," J. Lightwave Technology, LT-3(5), pp. 1062-1072, 1985.
- [5] M. Henning et. al., "Optical fiber hydrophones with download insensitivity," Proceedings of first international conference on optical fiber sensors, London, pp. 23-27, 1983.
- [6] J. Brooks, B. Moslehi, B. Kim, and H. Shaw, "Time domain addressing of remote fiber optic interferometric sensor arrays," IEEE J. Lightwave Technology, LT-5(7), pp. 1014-1023, 1987.
- [7] P. Nash, "Optical fiber hydrophone technology for sonar systems," Proceedings of the Undersea Defence Technology, Cannes, France, 1995.
- [8] A. Kersey, "Multiplexed interferometric fiber sensors," Proceedings of seventh international conference on optical fiber sensors, Sydney, pp. 313-319, 1995.
- [9] A. Kersey et. al., "64-element time division multiplexed interferometric sensor array with EDFA telemetry," OFC '96 Technical Digest 2, pp. 270-271, 1996.
- [10] C. Kirkendall, A. Davis, A. Dandridge, and A. Kersey, "64 channel all-optical deployable array," Naval Research Review, pp. 63-65, 1996.
- [11] 이종길, 윤형규, 서인창, "광섬유 하이드로폰 및 소나 기술 현황," 국방과 기술, 제205호, pp. 48-61, 1996.
- [12] 이종길, 윤형규, 서인창, "끝단이 막힌 중공 원통형 광섬유 하이드로폰의 감도 해석," 한국소음진동공학회지, 제6권, 제4호, pp. 475-479, 1996.
- [13] J. Dakin and C. Wade, "Optical Fibre Hydrophone Array-Recent Progress," SPIE 514, pp. 375-379, 1984.
- [14] S. Al-Chalabi, B. Culshaw, and D. Davies, "Partially coherent sources in interferometric sensors," Proceedings of the first international conference on optical fiber sensors, London, pp. 132-135, 1983.
- [15] K. Koo, "Passive stabilization scheme for fiber interferometers using 3x3 fiber directional coupler," Applied Physics Letters, 41, pp. 616, 1982.

 著 者 紹 介



이 종 길

1962년 2월 23일생

1984년 2월 부산대학교 기계공학과 학사,

1990년 12월, 미국 University of Utah, 기계공학과 M.S.

1993년 8월, 미국 University of

Utah, 기계공학과 Ph.D.

1984년 3월 ~ 1989년 8월 국방과학연구소 연구원

1995년 1월 ~ 1998년 2월 국방과학연구소 선임연구원

1998년 3월 ~ 현재 안동대학교 기계공학교육과 조교수

주관심 분야 : Rotating Machinery Vibration, 광섬유 및 음향센서 설계분야.